

1. Marcin BASZYŃSKI<sup>1</sup>, 2. Kacper SOWA<sup>2</sup>, 3. Stanisław PIRÓG<sup>1</sup>

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii (1),  
ABB Technology Center – Power Conversion (2)

ORCID: 1. 0000-0001-8145-1337, 2. 0000-0001-8246-2337, 3. 0000-0003-1638-2093

doi:10.15199/48.2021.09.01

## Filtr aktywny z dodatkowym zasobnikiem energii do kompensacji wahań moc czynnej – bilans energetyczny oraz praktyczna implementacja – część 1

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono jednofazowy filtr aktywny z zasobnikiem energii dwukierunkowym przekształtnikiem DC/DC, dedykowanym do kompensacji udarów mocy czynnej generowanych przez nieliniowe obciążenia o pracy przerywanej. Jako obiekt kompensacji użyto jednofazową zgrzewarkę punktową. Praca zawiera kompleksową analizę pracy urządzenia, która umożliwiła opracowanie aparatu matematycznego wykorzystanego do wymiarowania zasobnika. Wysoką skuteczność rozwiązania potwierdzono w wyniku badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych na zrealizowanym modelu laboratoryjnym urządzenia. W części 1 artykułu przedstawiono zasadę działania, wyniki analiz teoretycznych oraz dobór podstawowych parametrów w układzie.

**Abstract.** This paper presents a single-phase power filter with an energy storage bidirectional DC/DC converter. The device is dedicated to the compensation of active power surges generated by nonlinear loads characterized by intermittent operation. As a compensated and filtered object, the single-phase spot welding machine was assumed. The work contains a comprehensive analysis of the device's operation, which enabled the development of storage sizing methodology. The high efficiency of the solution was confirmed during simulation and experimental approach, on especially developed laboratory model. Part 1 of the article presents the principle of operation, results of theoretical analyzes and the selection of basic parameters in the system. (An active power filter with energy storage for power surge compensation- energy balance and practical implementation – Part 1).

**Słowa kluczowe:** filtr aktywny, zasobnik energii, udary mocy czynnej, zgrzewarka punktowa, jakość energii elektrycznej.

**Keywords:** active power filter, energy storage, power surges, spot welders, power quality.

### Wstęp

Rozwój współczesnego systemu energetycznego w porównaniu z dynamicznie zwiększającą się liczbą odbiorników wymagających dużego poboru energii w stosunkowo krótkich przedziałach czasu wymaga od operatora modernizacji (przewymiarowania) linii zasilającej, a od użytkownika zastosowania urządzeń wspierających prace linii zasilającej aby sprostać wymogom operatora. W przypadku odbiorników o pracy nieciągłej, w których czas pracy urządzenia w odniesieniu do czasu spoczynkowego jest relatywnie krótki, instalacja zasilająca (linia, aparatura rozdzielcza) jest projektowana dla obciążeń szczytowych.

Jednym z rozwiązań w skali makro jest wykorzystywanie coraz popularniejszych zasobników energii BESS (ang. battery energy storage system) bazujących na bateriach litowo - jonowych (ang. Li-Ion) [1]. urządzenia tego typu są coraz częściej odpowiedzialne za lokalne bilansowanie sieci energetycznej. Zapewniając prawidłową wartość napięcia i częstotliwości [2], poprzez nie przekraczanie dopuszczalnej mocy maksymalnej w miejscu gdzie zostały zainstalowane.

Prezentowane w artykule rozwiązanie filtra aktywnego z zasobnikiem energii dotyczy skali mikro (np. pojedynczych gospodarstw lub urządzeń), gdzie wymiar zjawisk jest zupełnie inny, a co za tym idzie wymaga odmiennego typu działań zmierzających do ograniczenia mocy aparatury dystrybucyjnej (transformatorów, przewodów, aparatury łączeniowej) [3-6].

Zastosowanie równoległego filtra aktywnego z dodatkowy zasobnikiem energii pozwala na ograniczenie negatywnego oddziaływania niespokojnych odbiorników na

linię zasilającą. Ponadto, rozwiązanie to umożliwia uzyskanie przepływu prądu w fazie z napięciem oraz ograniczenie zawartości harmonicznych prądu.

Urządzenie magazynuje energię w czasie braku obciążenia i wspomaga ich zasilanie podczas pracy, ograniczając tym samym szczytową wartość mocy i wymagania wobec m.in. instalacji zasilającej.

W trakcie badań jako obciążenie wykorzystano jednofazową zgrzewarkę z tyrystorowym regulatorem prądu. Podczas swojej pracy urządzenia tego typu wymuszają przepływ przez linie prądów odkształconych o dużej wartości składowej biernej, odpowiadającej za spadki napięcia na reaktancji linii zasilającej. Powstałe w ten sposób spadki napięcia niekorzystnie oddziałują na pracę wszystkich odbiorników dołączonych do tego samego węzła zasilającego.

Głównym wkładem prezentowanego artykułu jest opracowanie filtra aktywnego zintegrowanego z zasobnikiem energii dla układów jednofazowych. Podobną integrację zaproponowano w [7], jednak dotyczy ona systemu trójfazowego i odnawialnych źródeł energii. Urządzenia dedykowane do wybranego typu obciążenia nie są dobrze analizowane w literaturze ze względu na stosunkowo niską moc czynną, poniżej 4 kW.

Podobny problem dotyczy również mikrosieci okrętowych, gdzie więcej generatorów jest utrzymywanych w trybie online w celu zwiększenia niezawodności systemu [8]. Pracują one znacznie poniżej punktu optymalnej sprawności w celu kompensacji wahań spowodowanych dużymi obciążeniami dynamicznymi. Rozwiązanie

przedstawione w artykule może znacząco zwiększyć sprawność systemów tego typu, zmniejszyć zanieczyszczenie środowiska oraz zużycie paliw kopalnych.

W porównaniu z układami gdzie wykorzystywane są akumulatory jako zasobniki energii [9,10], skala czasowa, jak również charakter kompensowanego zjawiska umożliwia zastosowanie kondensatorów elektrolitycznych w wykorzystywanym zasobniku energii.

Prowadzone są również eksperymenty, w których rolę magazynów energii w kompensatorach mocy czynnej pełnią superkondensatory [11–13]. Jednak skala problemu jest inna i dotyczy wahań energii wiatrowej lub słonecznej.

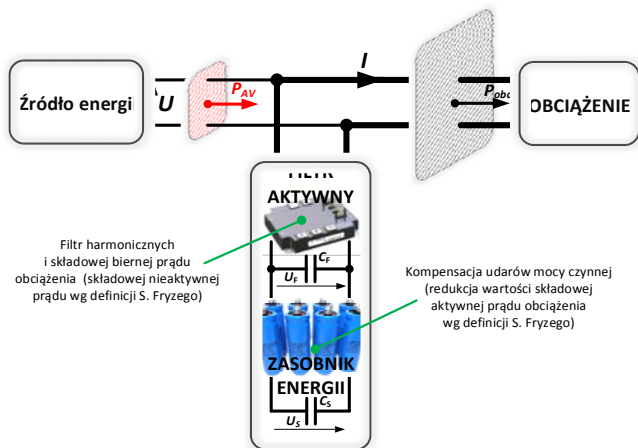
Alternatywą pozostaje również zastosowanie zasobników z masami wirującymi [14–17]. Zapewniają one wysokie  $dI/dt$ , jednak w analizowanym przypadku koszt instalacji nie znajduje uzasadnienia.

Wysoka skuteczność przedstawionego w artykule rozwiązania została potwierdzona w trakcie badań symulacyjnych oraz na specjalnie w tym celu zaprojektowanym i zbudowanym stanowisku laboratoryjnym jednofazowego filtra aktywnego, wraz z dodatkowym zasobnikiem energii, podczas kompensacji prądu zgrzewarki punktowej.

### Ogólna koncepcja działania układu

Ogólną koncepcję działania układu filtra aktywnego z zasobnikiem energii wraz z opisem funkcji realizowanym przez człony składowe urządzenia zilustrowano na rys. 1. Układ jest dołączony do źródła energii, równolegle z kompensowanym obciążeniem.

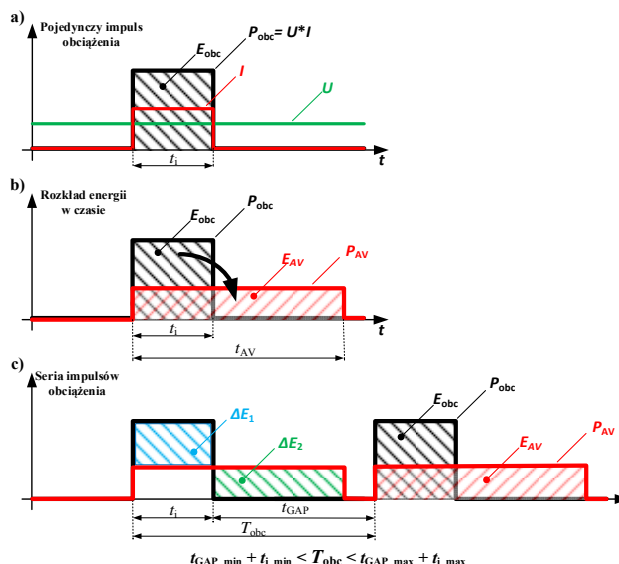
Załączenie obciążenia dołączonego do źródła o napięciu skutecznym  $U$  powoduje przepływ składowej czynnej prądu  $I$  (rys. 1 oraz rys. 2a). W przebiegu prądu obciążenia występują również harmoniczne i składowa bierna (składowa nieaktywna prądu wg S. Fryzego), stąd konieczność wykorzystania filtra aktywnego, jako interfejsu między układem zasobnika a źródłem energii (linią zasilającą).



Rys. 1. Ilustracja idei działania układu filtra aktywnego z dodatkowym zasobnikiem energii dołączonego do źródła energii równolegle z obciążeniem

Iloczyn wartości skutecznej podstawowej harmonicznej napięcia  $U$  oraz składowej czynnej prądu  $I$  odpowiada mocy czynnej obciążenia  $P_{obc}$  - średniej wartości mocy chwilowej (rys. 2a), a pole powierzchni ograniczone krzywą mocy jest równe energii  $E_{obc}$  pobranej ze źródła.

Kluczową funkcją układu jest kompensacja wahań/udarów mocy czynnej (prądu czynnego źródła) po załączeniu obciążenia. Proces uśredniania impulsów obciążenia, ilustrujący ideę wykorzystania zasobnika energii przedstawiono na rys. 2b.



Rys. 2. Ilustracja idei uśredniania impulsów obciążenia przez układ filtra aktywnego z zasobnikiem energii: a) pojedynczy impuls obciążenia; b) proces uśredniania - rozkładu energii w czasie; c) uśrednianie serii impulsów w czasie

Wartości energii  $E_{obc}$  dostarczonej ze źródła do odbiornika, podczas jego pojedynczego załączenia (impulsu), trwającego przez czas  $t_i$  opisuje zależność (1):

$$(1) \quad E_{obc} = P_{obc} \cdot t_i$$

Obniżenie wartości mocy  $P_{obc}$ , którą obciążane jest źródło przez odcinek czasu  $t_i$  do poziomu mocy  $P_{AV}$  (rys. 2b), wymaga proporcjonalnego zwiększenia czasu, przez który energia jest pobierana ze źródła. Zachowanie bilansu energetycznego przez system oznacza, iż pola powierzchni - energie  $E_{obc}$  oraz  $E_{AV}$ , powinny być sobie równe (2):

$$(2) \quad E_{AV} = E_{obc}$$

Proces uśredniania impulsu w pełni ilustruje zależność uzyskana w wyniku podstawienia (1) do (2):

$$(3) \quad P_{obc} \cdot t_i = P_{AV} \cdot t_{AV}$$

$$P_{AV} = P_{obc} \cdot \frac{t_i}{t_{AV}}$$

Podstawowymi założeniami są:

$$(4) \quad P_{AV} \ll P_{obc} \wedge t_i \ll t_{AV} \wedge t_{AV} < t_{GAP}$$

gdzie:  $P_{obc}$  - moc obciążenia;  $P_{AV}$  - obniżona wartość mocy obciążającej źródło;  $t_i$  - czas na jaki załączane jest obciążenie,  $t_{GAP}$  - minimalny odstęp czasu pomiędzy kolejnym załączeniem obciążenia;  $t_{AV}$  - ekwiwalent czasu  $t_i$  pozwalający na przesłanie tej samej energii, ale z mniejszą mocą ( $P_{AV}$ ).

Odstęp między kolejnymi załączeniami obciążenia ( $t_{GAP}$ ), jak również czas trwania pojedynczego impulsu ( $t_i$ ) oraz jego moc ( $P_{obc}$ ) są ogólnie zdefiniowane przez proces technologiczny. Suma  $t_i + t_{GAP}$  określa „pseudo okres” ( $T_{obc}$ ) kolejnych załączeń obciążenia, dokonywanych w zdefiniowanym przedziale czasu.

Dobrana przez układ wartość mocy  $P_{AV}$  zgodnie z (3), którą obciążane jest źródło w czasie  $t_{AV}$  (mniejszym od  $t_{GAP}$ ), powinna zapewnić poprawny rozkład impulsu obciążenia  $P_{obc}$  przed pojawieniem się kolejnego, bez konieczności zwiększania wartości mocy jaką obciążane jest źródło w okresie ( $T_{obc}$ ), co zilustrowano na rys. 2c.

Analiza procesu produkcyjnego pozwala określić przedziały czasu charakterystyczne dla danego ciągu

technologicznego. Należy do nich zaliczyć minimalny i maksymalny czas trwania (zmienność) okresu  $T_{obc}$  (5):

$$(5) \quad T_{obc\_min} \leq T_{obc} \leq T_{obc\_max}$$

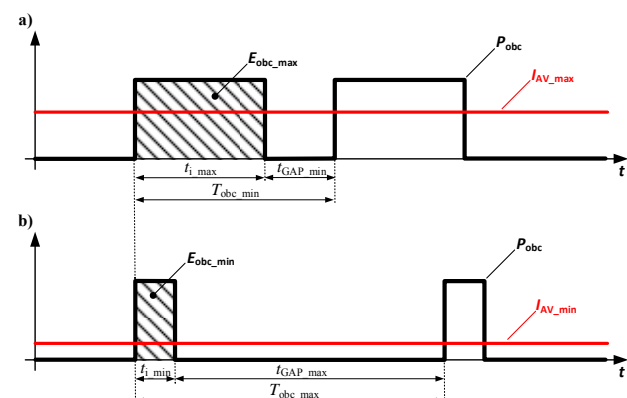
oraz minimalny i maksymalny czas trwania pojedynczego impulsu obciążenia  $t_i$ , stanowiący wielokrotność pełnej liczby okresów napięcia źródła (6):

$$(6) \quad t_{i\_min} \leq t_i \leq t_{i\_max}$$

Układ musi zapewnić poprawną pracę przy najdłuższych impulsach obciążenia  $t_{i\_max}$  powtarzających się z najmniejszym okresem  $T_{obc\_min}$  (maksymalna energia i moc źródła) oraz przy najkrótszych czasach trwania impulsów obciążenia  $t_{i\_min}$  powtarzających się z największym okresem  $T_{obc\_max}$  (istotne w kontekście dynamiki układ regulacji), obie sytuacje zilustrowano na rys. 3.

W przypadku mocy odbiornika  $P_{obc}$  istnieje również możliwość zdefiniowania maksymalnej i minimalnej wartości, charakterystycznej dla danej technologii, co ma zasadnicze znaczenie zwłaszcza podczas wymiarowania elementów pasywnych w strukturze filtru i zasobnika (7):

$$(7) \quad P_{obc\_min} \leq P_{obc} \leq P_{obc\_max}$$



Rys. 3. Graniczne stany pracy obciążenia, ze stałą wartością mocy  $P_{obc}$ : a) praca z maksymalnym czasem trwania impulsu obciążenia  $t_{i\_max}$  załączanego z minimalnym okresem  $T_{obc\_min}$  (maksymalna energia); b) praca z minimalnym czasem trwania impulsu obciążenia  $t_{i\_min}$  załączanego z maksymalnym okresem  $T_{obc\_max}$ ;  $I_{AV\_min}/I_{AV\_max}$  - minimalna/maksymalna uśredniona wartość prądu źródła zapewniająca zachowanie bilansu energetycznego przez układ filtru z zasobnikiem

Określenie maksymalnej mocy obciążenia  $P_{obc\_max}$  oraz maksymalnego czasu trwania pojedynczego impulsu  $t_{i\_max}$ , załączanego w odstępach nie krótszych niż  $t_{GAP\_min}$  ( $T_{obc\_min}$ ), pozwala na wyznaczenie maksymalnej wartości obniżonej mocy  $P_{AV}$ , możliwej do uzyskania dla przyjętego typu obciążenia w zakładanym czasie między impulsami, co jest istotne ze względu na źródło zasilania, gdyż określa w jakim stopniu zostanie obniżona jego moc (8):

$$(8) \quad P_{AV\_max} = P_{obc\_max} \cdot \frac{t_{i\_max}}{T_{obc\_max}}$$

gdzie:  $P_{obc\_max}$  - maksymalna moc obciążenia;  $P_{AV\_max}$  - maksymalna wartość mocy obciążającej źródło;  $t_{i\_max}$  - maksymalny czas na jaki załączane jest obciążenie,  $T_{obc\_min}$  - minimalny odstęp (okres) pomiędzy kolejnymi załączeniami obciążenia.

Działanie układu wymaga zmagazynowania odpowiedniej porcji energii  $\Delta E_1$  w strukturze zasobnika (rys. 2c). Energia  $\Delta E_1$  jest wydawana z układu w czasie gdy obciążenie jest załączone - przez co następuje zamierzony efekt ograniczenia mocy źródła. Po wyłączeniu obciążenia ma miejsce uzupełnienie ubytku energii  $\Delta E_1$  o wartość  $\Delta E_2$

ze stałą mocą (układ utrzymuje przepływ prądu  $I_{AV}$ ), dzięki czemu, zachodzi zbilansowanie energetyczne układu (9):

$$(9) \quad \Delta E_2 = \Delta E_1$$

Przyjęta wartość mocy  $P_{AV}$  zapewnia, iż w trakcie czasu  $t_{AV} < T_{obc}$  ubytek energii  $\Delta E_1$  zostanie uzupełniony przed ponownym załączeniem obciążenia, a układ będzie w pełni przygotowany na jego kolejne załączenie.

Z zależności (9) wynika także, iż minimalna ilość energii zmagazynowana w układzie zasobnika  $E_{S\_min}$  powinna być większa od  $\Delta E_1$ , dla założonej maksymalnej mocy odbiornika ( $P_{obc\_max}$ ), maksymalnego czasu trwania pojedynczego impulsu ( $t_{i\_max}$ ) oraz minimalnego odstępu pomiędzy kolejnymi impulsami ( $t_{GAP\_min}$ ). Minimalną wartość energii zmagazynowanej w układzie z uwzględnieniem strat  $\Delta E$  określono za pomocą zależności (10):

$$(10) \quad \begin{aligned} E_{S\_min} &> P_{obc\_max} \cdot t_{i\_max} + \Delta E \\ E_{S\_min} &> E_{obc\_max} + \Delta E \end{aligned}$$

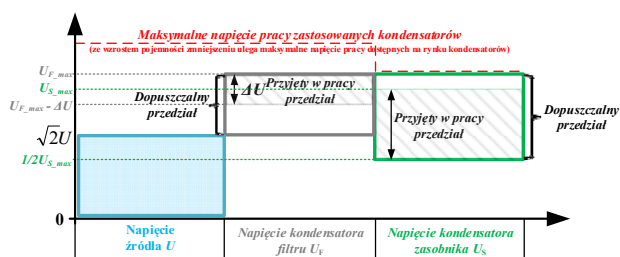
Dobrana w ten sposób wartość zmagazynowanej energii  $E_{S\_min}$  zapewni, iż podczas załączania obciążenia układ będzie posiadał odpowiedni jej zapas do skompensowania przewidzianego charakteru obciążenia oraz pokrycie wewnętrznych strat na elementach.

Do realizacji zaprezentowanych założeń konieczny jest przedstawiony w pracy układ filtru z dodatkowym zasobnikiem energii. Działanie zaproponowanego układu nie wpływa na prąd (moc) obciążenia, natomiast przyczynia się do ograniczenia prądu źródła.

Wykorzystana kaskadowa struktura połączeń filtru oraz zasobnika zapewnia pełną realizację postawionych przed rozwiązaniem celów. Zadaniem filtru aktywnego jest eliminacja harmonicznych oraz składowej biernej prądu (składowej nieaktywnej wg S. Fryzego), natomiast rolą zasobnika jest ograniczenie wahań mocy czynnej występujących podczas załączenia obciążenia, odbywa się to poprzez ograniczenie składowej aktywnej prądu, kosztem energii zmagazynowanej w strukturze zasobnika.

Kluczowe znaczenie ze względu na wykorzystywane w pracy magazyny energii w postaci kondensatorów jest ich robocze napięcie pracy, od którego w drugiej potęgę zależy ilość zmagazynowanej energii.

Minimalna wartość napięcia  $U_F$  na kondensatorze filtru  $C_F$  dla właściwego kształtowania przebiegów prądu musi być większa niż wartość szczytowa napięcia źródła, dobór poziomu napięcia oraz jego dopuszczalny przedział zmian przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Dobór istotnych ze względu na charakter pracy układu przedziałów napięć w obwodzie

Wartość pojemności filtru  $C_F$  została wyznaczona w wyniku przekształcenia zależności opisującej energię zgromadzoną przez kondensator, tak aby jej wartość za okres napięcia źródła, podczas pracy z maksymalną założoną mocą obciążenia  $P_{obc\_max}$  nie spadła poniżej progu gwarantującego poprawną pracę (11):

$$(11) \quad E_{F\_max} - E_{obc\_max(1)} \geq E_{F\_min}$$

gdzie:

$$(12) \quad E_{F\_max} = \frac{1}{2} C_F U_{F\_max}^2$$

$$(13) \quad E_{F\_min} = \frac{1}{2} C_F U_{F\_min}^2$$

$$(14) \quad E_{obc\_max(1)} = P_{obc\_max} \cdot T = \frac{P_{obc\_max}}{f_i}$$

$$(15) \quad U_{F\_min} = U_{F\_max} - \Delta U$$

gdzie:  $E_{F\_max}$  - maksymalny poziom energii zgromadzony w kondensatorze  $C_F$ ;  $E_{F\_min}$  - minimalny poziom energii zgromadzony w kondensatorze  $C_F$ ;  $E_{obc\_max(1)}$  - maksymalna wartość energii pobrana przez obciążenie pracujące z mocą maksymalną  $P_{obc\_max}$  w czasie jednego okresu napięcia źródła  $T = 1/f_i$ ;  $f_i$  - częstotliwość podstawowej harmonicznej źródła energii;  $U_{F\_max}$  - wartość maksymalna (robocza) napięcia na kondensatorze  $C_F$ ;  $\Delta U$  - dopuszczalny spadek napięcia na kondensatorze  $C_F$ .

W wyniku podstawienia zależności (12)-(15) do (11) otrzymano wyrażenie (16) na wyznaczenie minimalnej wartości pojemności kondensatora filtra:

$$(16) \quad C_F \geq \frac{P_{obc\_max}}{f_i(U_{F\_max}\Delta U - \frac{\Delta U^2}{2})}$$

Uzyskana na podstawie zależności (16) wartość pojemności  $C_F$  zapewnia, iż przy założonym napięciu pracy zgromadzona energia zagwarantuje poprawną kompensację co najmniej jednego impulsu obciążenia w przypadku braku reakcji układu sterowania.

Kluczowym zagadnieniem w analizowanym układzie jest dobór wartości pojemności kondensatora zasobnika energii  $C_S$ . Ilość gromadzonej w nim energii ( $E_S$ ) przekłada się bowiem na szybkość zmian prądu realizowanego przez filtr oraz jego minimalną wartość.

Zwiększenie ilości magazynowanej energii (np. przez zastosowanie zasobnika o większej pojemności), umożliwia zastosowanie wolniejszego regulatora, a przez to lepsze uśrednianie w czasie wypracowywanej referencji prądu źródła.

Energia zgromadzona w kondensatorze  $C_S$  powinna kompensować ubytki energii ( $E_F$ ) w kondensatorze  $C_F$  w czasie pracy obciążenia jak również straty w elementach  $\Delta E$ , bez konieczności zmiany wartości realizowanego prądu źródła.

Zbyt mała wartość pojemności zasobnika wymusza z kolei pracę z większym prądem źródła (lub większymi wahaniami jego wartości skutecznej), tak aby załączenie obciążenia nie powodowało znaczących zmian poziomów energii w znajdujących się w układzie kondensatorach, a układ zachował możliwości kompensacyjne.

W przypadku kondensatora  $C_S$  w strukturze zasobnika, napięcie robocze  $U_{S\_max}$  nie może przekroczyć wartości napięcia  $U_{F\_max}$  pracy kondensatora  $C_F$ . Minimalna, przyjęta wartość napięcia  $U_S$  to 1/2 wartości znamionowej, która oznacza naładowanie zasobnika w zaledwie 25%. Rozładowanie kondensatora poniżej tej wartości w praktyce wyklucza już dalszą pracę układu (transfer energii z przekształtnika do kondensatora filtra jest nieefektywny). Dobór poziomu napięcia oraz jego dopuszczalny przedział zmian przedstawiono na rys. 4.

Dobrana wartość pojemności  $C_S$  zasobnika, przy założonym napięciu pracy gwarantuje zapas energii na kompensację zakładanej liczby impulsów obciążenia, zanim zasobnik zostanie rozładowany do poziomu energii minimalnej.

Połączenie filtra i zasobnika jest realizowane przez układ dwukierunkowego nieseparowanego przekształtnika

DC/DC, który zapewni odpowiednie dopasowanie napięciowe i realizację stawianych układowi celów.

Wartość pojemności  $C_S$  została wyznaczona w wyniku przekształcenia zależności opisującej energię zgromadzoną przez kondensator, tak aby podczas kompensacji obciążenia załączonego na maksymalny czas  $t_{i\_max}$ , (będący wielokrotnością całkowitej liczby okresów  $T$  napięcia źródła  $t_{i\_max} = n_{max} \cdot T$ ) oraz pracującego z mocą maksymalną  $P_{obc\_max}$ , ilość zmagazynowanej energii nie spadła poniżej progu gwarantującego poprawną pracę przekształtnika DC/DC (17):

$$(17) \quad E_{S\_max} - E_{obc\_max(n)} \geq E_{S\_min}$$

gdzie:

$$(18) \quad E_{S\_max} = \frac{1}{2} C_S U_{S\_max}^2$$

$$(19) \quad E_{S\_min} = \frac{1}{2} C_S U_{S\_min}^2$$

Pojedyncze załączenie obciążenia (impuls), pracującego z mocą maksymalną, załączonego na  $n$  okresów napięcia źródła, oznacza wydatek energetyczny rzędu (20):

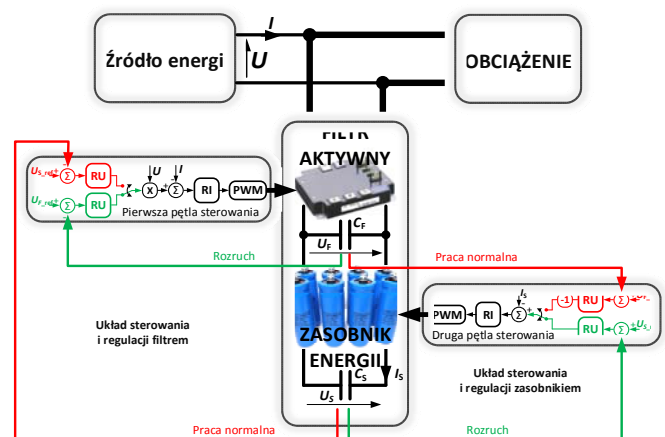
$$(20) \quad E_{obc\_max(n)} = t_{i\_max} \cdot P_{obc\_max} = n_{max} \cdot T \cdot P_{obc\_max} = n_{max} \cdot E_{obc\_max(1)}$$

gdzie:  $n_{max}$  - założona maksymalna liczba okresów pracy obciążenia z mocą maksymalną podczas jednego cyklu załączenia;  $E_{obc\_max(1)}$  - energia pobierana przez obciążenie w trakcie jednego okresu załączenia;  $E_{obc\_max(n)}$  - energia pobierana przez obciążenie w trakcie „n” okresów załączenia

Po podstawieniu (18), (19) oraz (20) do (17) otrzymano zależność na minimalną wartość pojemności  $C_S$ , która gwarantuje, iż podczas pojedynczego załączenia obciążenia na czas  $t_{i\_max}$  napięcie  $U_S$  pracującego układu, nie spadnie poniżej progu minimalnego  $U_{S\_min}$  przyjętego na poziomie 1/2  $U_{S\_max}$  (21):

$$(21) \quad C_S \geq \frac{2 \cdot E_{obc\_max(n)}}{U_{S\_ref}^2 - U_{S\_min}^2} \Rightarrow \Rightarrow C_S \geq 2.67 \frac{P_{obc\_max} \cdot t_{i\_max}}{U_{S\_max}^2}$$

gdzie:  $P_{obc\_max}$  - maksymalna moc czynna obciążenia;  $t_{on\_max}$  - maksymalny czas na jaki załączane jest obciążenie  $U_{S\_max}$  - wartość maksymalna (robocza) napięcia na kondensatorze  $C_S$ .



Rys. 5. Ogólna struktura sterowania i regulacji układem: kolorem zielonym oznaczono sprzężenia zwrotne w trakcie rozruchu układu, natomiast kolorem czerwonym sprzężenia zwrotne podczas pracy normalnej



Nad prawidłową pracą urządzenia czuwają dwa kaskadowe układy sterowania i regulacji o przełączalnej strukturze (rys. 5), do których implementacji wykorzystano regulatory proporcjonalno - całkujące PI. Struktura pojedynczej pętli sterowania składa się z wewnętrznego, szybkiego regulatora prądu oraz dwóch zewnętrznych (wolniejszych) regulatorów napięcia, z których jeden jest wykorzystywany podczas rozruchu, a drugi w trakcie pracy normalnej (regulator prądu wspólny dla obu faz pracy układu).

W czasie fazy rozruchowej zadaniem pierwszej z pętli sterowania jest stabilizacja napięcia  $U_F$  na zadanym poziomie (linie koloru zielonego na rys. 5). Filtr zachowuje się w tym czasie jak prostownik o sinusoidalnym prądzie źródła (energia transferowana ze źródła energii do kondensatora filtru  $C_F$ ), równocześnie z pracą filtru ma miejsce ładowanie pojemności w obwodzie zasobnika (energia przesyłana z kondensatora filtru  $C_F$  do kondensatora zasobnika  $C_S$ ). Za kontrolę napięcia  $U_S$  odpowiada druga z wykorzystywanych pętli sterowania. Po osiągnięciu przez napięcia  $U_F$  oraz  $U_S$  poziomów referencyjnych (roboczych) następuje przełączenie struktury regulacji na wykorzystywaną podczas pracy normalnej (linie koloru czerwonego na rys. 5).

W trakcie pracy normalnej poziom napięcia  $U_F$  na kondensatorze filtru  $C_F$  jest kontrolowany przez układ zasobnika (drugą z pętli sterowania). Zasobnik nie posiada informacji o aktualnym poziomie energii zgromadzonej w swoim kondensatorze  $C_S$ . Za kontrolę poziomu energii (napięcia) zasobnika odpowiedzialna jest z kolei pierwsza z pętli sterowania, która na podstawie napięcia  $U_S$  wypracowuje referencję prądu źródła.

W związku z tym, iż układ regulacji filtru (pierwsza pętla) nie posiada informacji o aktualnym poziomie napięcia  $U_F$  na kondensatorze  $C_F$ , jego wartość nie wpływa bezpośrednio na zadawaną wartość prądu źródła, która skutkiem tego może być utrzymywana praktycznie stała w czasie.

Zastosowane w pracy regulatory prądu PI charakteryzują się dużym (w porównaniu z regulatorami napięcia) współczynnikiem wzmocnienia członu proporcjonalnego  $K_p$  (od 50 do 130), koniecznym dla zapewnienia odpowiedniej dynamiki, natomiast czas zdwojenia  $T_i$  członów całkujących dobrano rzędu pojedynczych ms (od 1 do 5 ms).

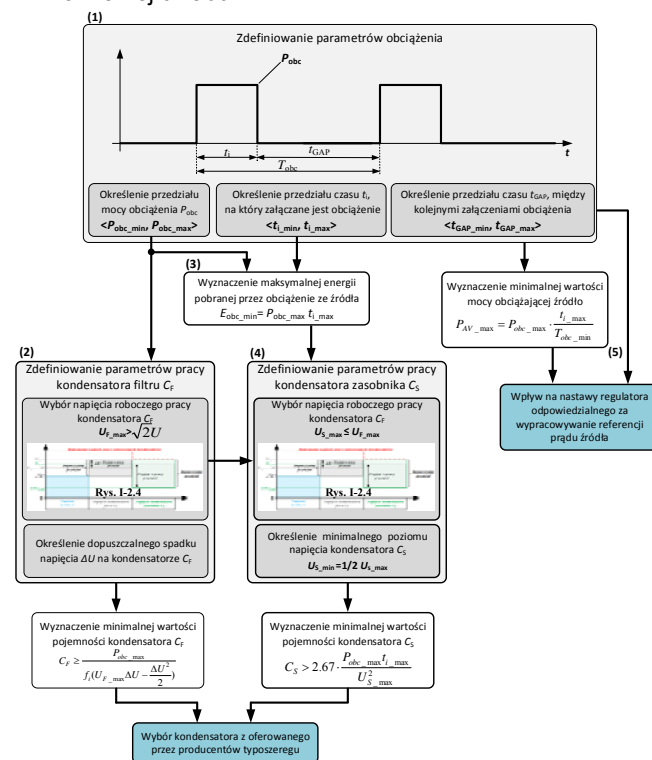
W przypadku regulatorów napięcia wartości wzmocnień członów proporcjonalnych nie przekraczają jedności (od 0,03 do 0,22), a dobrane czasy zdwojenia kilkunastu ms (od 10 do 20 ms). Niewielka wartość współczynnika wzmocnienia  $K_p < 1$  w strukturze pierwszej z pętli sterowania filtrem, zapewnia podczas rozruchu odpowiednie tłumienie trzeciej harmonicznej w generowanym przebiegu prądu źródła.

Kluczowe znaczenie ze względu na funkcję uśredniania impulsu mocy obciążenia mają nastawy regulatora napięcia, wykorzystywanego w trakcie pracy normalnej przez pierwszą z pętli i sterowania filtrem. Regulator ten charakteryzuje się pomijalnie małym współczynnikiem wzmocnienia członu proporcjonalnego ( $K_p = 0,03$ ), gwarantującym jednak stabilizację napięcia  $U_S$  w założonym zakresie, bez możliwości przekroczenia dopuszczalnych progów bezpieczeństwa. Czas zdwojenia członu całkującego regulatora na poziomie 40 s, przyjęto na podstawie maksymalnego założonego odstępu między kolejnymi załączeniami obciążenia (20 s). Dobre w ten sposób nastawy regulatora zapewniają odpowiedni rozkład (uśrednianie) impulsu obciążenia w czasie. Wolne działanie regulatora (proces uzupełniania energii) jest możliwy tylko dzięki zastosowaniu odpowiednio dużego zasobnika energii (kondensatora  $C_S$ ). Pojemność zasobnika musi zapewnić

zapas energii równy co najmniej jednemu impulsowi obciążenia, o zakładanej mocy i czasie, a ubytek energii musi zostać uzupełniony przepływem dużo mniejszego prądu w czasie nie dłuższym niż do kolejnego załączenia obciążenia.

Podsumowaniem ogólnej koncepcji działania filtru aktywnego z zasobnikiem energii, jest opracowany algorytm, zilustrowany na rys. 6, umożliwiający zwymiarowanie podstawowych elementów układu w zależności od zdefiniowanych granicznych parametrów charakteryzujących wykorzystywany typ obciążenia. Struktura algorytmu opiera się o następujące działania:

- (1) zdefiniowanie parametrów granicznych charakteryzujących pracę obciążenia, istotnych dla opracowanego układu;
- (2) ustalenie napięcia roboczego kondensatora filtru  $C_F$  oraz wyznaczenie na tej podstawie jego minimalnej pojemności;
- (3) wyznaczenie maksymalnej energii pobranej przez obciążenie w trakcie jego pojedynczego załączenia;
- (4) ustalenie napięcia roboczego kondensatora zasobnika  $C_S$  oraz wyznaczenie na tej podstawie jego minimalnej pojemności;
- (5) uwzględnienie parametrów obciążenia (minimalnego i maksymalnego czasu między kolejnym załączeniem obciążenia) w trakcie doboru nastaw regulatorów, szczególnie regulatora odpowiedzialnego za wypracowywanie referencji prądu źródła podczas pracy normalnej układu.



Rys. 6. Ilustracja algorytmu zastosowanego do wyznaczania parametrów układu filtru z zasobnikiem na podstawie zdefiniowanego typu obciążenia: (1)- określenie parametrów granicznych charakteryzujących pracę obciążenia; (2)- wyznaczenie parametrów pracy i pojemności kondensatora filtru  $C_F$ ; (3)- wyznaczenie maksymalnej energii pobranej przez obciążenie w trakcie pojedynczego impulsu załączenia; (4)- wyznaczenie parametrów pracy i pojemności kondensatora zasobnika  $C_S$ ; (5)- uwzględnienie parametrów charakteryzujących obciążenie podczas doboru nastaw regulatorów

## Dobór parametrów elementów pasywnych w strukturze układu

W trakcie prac nad układem założono, iż będzie on współpracował z siecią jednofazową o napięciu 230 V i dopuszczalnej długotrwałej wartości prądu nie przekraczającej 16 A. Wprowadza to dodatkowe ograniczenia związane z maksymalną wartością mocy i prądu w miejscu przyłączenia analizowanego typu odbiornika.

Wartość pojemności  $C_F$  została wyznaczona zgodnie z zależnością (16). Przy założeniu stabilizacji napięcia na kondensatorze  $C_F$  na poziomie nie przekraczającym  $U_{F\_max} = 500$  V, dopuszczalnym spadku  $\Delta U$  na poziomie 100 V (minimalna wartość na poziomie 400 V - większa niż determinowana przez amplitudę napięcia linii  $\sqrt{2}U_{LINII}$  [18]) oraz pracy z mocą ok. 1,0 kW, przy częstotliwości podstawowej harmonicznej wynoszącej 50 Hz, wartość pojemności powinna wynosić ok. 444  $\mu$ F.

Obliczenie wartości pojemności  $C_F$  na podstawie otrzymanej zależności (16), z podstawieniem odpowiednich wartości, przedstawia wyrażenie (22):

$$(22) \quad C_F \geq \frac{1000}{500(500 \cdot 100 - \frac{100^2}{2})} = 444 \mu F$$

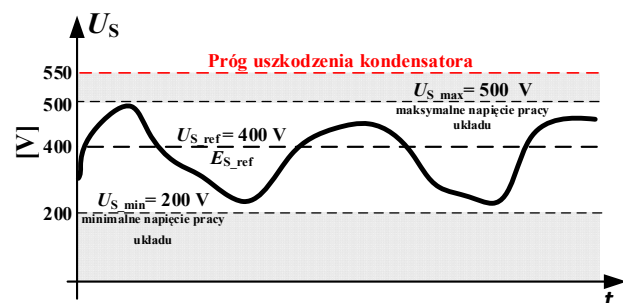
gdzie:  $P_{max}$  - maksymalna moc czynna obciążenia;  $f_i$  - częstotliwość podstawowej harmonicznej;  $U_{F\_max}$  - wartość maksymalna napięcia na kondensatorze  $C_F$ ;  $\Delta U$  - dopuszczalny spadek napięcia na kondensatorze  $C_F$

W trakcie dalszych prac, zastosowano kondensator  $C_F$  o wartości 400  $\mu$ F i napięciu maksymalnym 1000 V, wykonany w technologii metalizowanej taśmy polipropylenowej [19]. Zanizanie wartości pojemności  $C_F$  wynikało z oferowanego przez producentów typoszeregu.

Kluczowe znaczenie w przypadku doboru wartości pojemności kondensatora  $C_S$  ma wybór jego optymalnego napięcia pracy, ze względu na funkcje realizowane przez układ przekształtnika DC/DC. Kondensator  $C_S$  musi pracować z napięciem niższym niż napięcie referencyjne kondensatora  $C_F$  (500 V), aby praca przekształtnika w trybie buck była możliwa (transfer energii z kondensatora  $C_F$  do  $C_S$ ).

W analizowanym przypadku, przyjęto napięcie referencyjne (robocze)  $U_S$  na poziomie 400 V, aby maksymalnie wykorzystać zdolność gromadzenia energii zastosowanego kondensatora. Napięcie to, znajduje się w przedziale ograniczonym maksymalną dopuszczalną wartością napięcia na kondensatorze  $C_S$  (500 V), a minimalną przyjętą na poziomie 200 V, przy której zasobnik jest naładowany w zaledwie 25%, a dalsza praca w trybie boost jest mało efektywna (transfer energii z kondensatora  $C_S$  do  $C_F$ ).

Opisane przedziały napięciowe przedstawiono poglądowo na rys. 7. Szerokość tak ograniczonego przedziału dopuszczalnych zmian napięcia  $U_S$  gwarantuje odpowiednie warunki pracy układu zasobnika.



Rys. 7. Istotne ze względu na charakter pracy przekształtnika DC/DC przedziały napięcia  $U_S$

Pojedyncze załączenie obciążenia, pracującego z mocą maksymalną, załączonego na 6 okresów napięcia linii zasilającej (analiza przedstawiona w podrozdziale I-3.2), oznacza wydatek energetyczny rzędu 120 J, zgodnie z (23):

$$(23) \quad E_{obc\_max(6)} = n_{max} \cdot E_{obc\_max(1)} = 6 \cdot 20 = 120 J$$

gdzie:  $n$  - założona maksymalna liczba okresów pracy obciążenia z mocą maksymalną podczas jednego cyklu załączenia;  $E_{OBC(1)}$  - energia pobierana przez obciążenie w trakcie jednego okresu załączenia;  $E_{OBC(6)}$  - energia pobierana przez obciążenie w trakcie sześciu okresów załączenia.

Wartość pojemności  $C_S$  została wyznaczona za pomocą zależności (21). W wyniku podstawienia odpowiednich wartości ( $U_{S\_min} = 200$  V oraz  $U_{S\_ref} = 400$  V) wyznaczono następującą wartość pojemności  $C_S$  (24):

$$(24) \quad C_S \geq 2.67 \frac{1000 \cdot 120 mS}{400^2} = 2 mF$$

Przy tak dobranej wartości pojemności energia  $E_S$  zgromadzona przy napięciu roboczym o wartości 400 V zapewni poprawną pracę układu dla założonej liczby - 6 cykli, na które zostanie załączone obciążenie.

W trakcie dalszych prac, wartość pojemności  $C_S$  (ze względu na straty i zaokrąglenie w dół pojemności filtru  $C_F$ ) przewymiarowano, dobierając kondensator elektrolityczny o znacznie większej pojemności 4700  $\mu$ F i napięciu maksymalnym pracy 500 V [20] z oferowanego przez producenta typoszeregu wartości E6. Działanie takie, umożliwiło w przypadku badań laboratoryjnych testowanie pracy układu, podczas kompensacji obciążenia załączanego na znacznie większą liczbę okresów, niż przewidziana w trakcie analizy teoretycznej.

Jednocześnie, dobrana wartość pojemności oraz margines 100 V poniżej dopuszczalnej wartości napięcia  $U_{S\_max}$ , gwarantuje odpowiedni zapas na ewentualne magazynowanie energii. Dopuszczalna szerokość przedziału zmian napięcia  $U_S$ , wynika z konieczności zbilansowania przepływu składowej czynnej przy założonej „wolnej” dynamice regulatora  $I_{ref}$ .

W tak dobranym kondensatorze  $C_S$  o pojemności 4700  $\mu$ F istnieje możliwość zgromadzenia 376 J (przy napięciu wynoszącym 400 V), co daje bezpieczny zapas energii na kompensację ok. 14 okresów załączenia obciążenia pracującego z mocą maksymalną (zanim kondensator zostanie rozładowany do poziomu 200 V). Dla porównania, energia zgromadzona w kondensatorze  $C_F$  dla założonych warunków pracy wynosi ok. 50 J, a jej poziom gwarantuje zapas energii, na co najmniej jeden okres pracy obciążenia. Dowodzi to, iż kondensator  $C_F$  jest traktowany w układzie jedynie, jako niewielki bufor energetyczny, który pośredniczy w wymianie energii między zasobnikiem a obciążeniem (linią zasilającą), jednak kondensator  $C_F$  jest niezbędny, ze względu na funkcje realizowaną przez filtr.

Bilans energetyczny na podstawie tych wartości potwierdza, iż energia zgromadzona w przekształtniku DC/DC i filtrze zapewni poprawne warunki pracy układu, bez konieczności ingerowania w wypracowaną referencyjną prąd w trakcie załączenia obciążenia.

**Autorzy:** dr hab. inż. Marcin Baszyński, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, Al. Mickiewicza 30, 31-038 Kraków, E-mail: mbaszyn@agh.edu.pl;

dr inż. Kacper Sowa, ABB Technology Center, Starowiślna 13A, 31-038 Kraków, Poland, E-mail: kacper.sowa@pl.abb.com;

prof. dr hab. inż. Stanisław Piróg, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, Al. Mickiewicza 30, 31-038 Kraków, E-mail: pirog@agh.edu.pl

## LITERATURA

- [1] Byrne R. H., Nguyen T. A., Copp D. A., Chalamala B. R., Gyuk I., Energy Management and Optimization Methods for Grid Energy Storage Systems, *IEEE Access* (2018), 6, 13231-13260
- [2] Chen S., Zhang T., Gooi H. B., Masiello R. D., Katzenstein W., Penetration Rate and Effectiveness Studies of Aggregated BESS for Frequency Regulation, *IEEE Transactions on Smart Grid* (2016) 7, n.1, 167-177
- [3] Baszynski M., Sowa K., Pirog S., An Active Power Filter with Energy Storage and Double DC Conversion for Power Surge Compensation, *Electronics* (2020), 9, 1489
- [4] Sowa K., Baszyński M., Piróg S., Jednofazowy energetyczny filtr aktywny z zasobnikiem energii do kompensacji wahań mocy czynnej w linii zasilającej, *Przegląd Elektrotechniczny* (2017) 93, n.3, 260-266
- [5] Sowa K., Baszyński M., Piróg S., One phase active filter with energy storage for active power surge compensation in feed line, *Archives of Electrical Engineering* (2016) 65, n.2, 221-234
- [6] Sowa K., Baszynski M., Pirog, S., Single-phase active filter with an energy storage system used for compensation of active-power fluctuations - HIL tests on real time simulator RTS, *Przegląd Elektrotechniczn* (2019) 95, 200-207
- [7] Somayajula D., Crow M. L., An integrated active power filter – ultracapacitor design to provide intermittency smoothing and reactive power support to the distribution grid, *IEEE Transactions Sustain. Energy* (2014) 5, 1116-1125
- [8] Mutarraf M. U., Terriche Y., Niazi K. A. K., Vasquez J. C., Guerrero J. M., Energy Storage Systems for Shipboard Microgrids - A Review, *Energies* (2018), 11, 3492
- [9] Ding M., Chen Z., Wang B., Chen Z., Luo Y., Zheng G., Unified control of smoothing out wind power fluctuations and active power filtering by an energy storage system, *Proceedings of the IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies* (2012), Tianjin, China, 1-5
- [10] Gadalla A. S., Yan X., Hasabelrasul H., Performance of the battery energy storage systems based on cascaded H-bridge multilevel converter, *J. Eng.* (2019), 16, 779-783
- [11] Abeywardana D. B. W., Hredzak B., Agelidis V., Demetriades G. D., Supercapacitor Sizing Method for Energy-Controlled Filter-Based Hybrid Energy Storage Systems, *IEEE Trans. Power Electron.* (2017), 32, 1626-1637
- [12] Yan N., Zhang B., Li W., Ma S., Hybrid Energy Storage Capacity Allocation Method for Active Distribution Network Considering Demand Side Response, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* (2019), 29, 1-4
- [13] Manandhar U., Tummuru N. R., Kollimalla S. K., Ukil A., Beng G.H., Chaudhari K., Kumar S., Validation of Faster Joint Control Strategy for Battery and Supercapacitor - Based Energy Storage System, *IEEE Trans. Ind. Electron.* (2018), 65, 3286-3295
- [14] Yan Z., Zhang X. P., General energy filters for power smoothing, tracking and processing using Energy Storage, *IEEE Access* (2017), 5, 19373-19382
- [15] Abdeltawab H., Mohamed Y. A. I., Robust Energy Management of a Hybrid Wind and Flywheel Energy Storage System Considering Flywheel Power Losses Minimization and Grid-Code Constraints, *IEEE Trans. Ind. Electron.* (2016), 63, 4242-4254
- [16] Ye C., Yang J., Xu W., Xiong F., Liang X., A Novel Multi-Unit Out-Rotor Homopolar Inductor Machine for Flywheel Energy Storage System, *IEEE Trans. Magn.* (2018), 54, 1-5
- [17] Bendib C., Kesraoui M., Wind-Solar Power System associated with Flywheel and Pumped-Hydro EnergyStorage, *Proceedings of the 10th International Renewable Energy Congress*, Sousse, Tunisia (2019), 1-6
- [18] Piróg S., Energoelektronika: układy o komutacji sieciowej i o komutacji twardej, *AGH Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne* (2006)
- [19] Vishay ESTA, Power electronic, DC capacitors, standard capacitors in cylindrical casing, oil impregnated, self-healing, with fuse (2002)
- [20] Itecond, Aluminium Electrolytic Capacitors - Series AS(U), AS(U)M472M500DF1 (2012)